

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Andrea Ladavac**

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivan Stojanović

Student:

Andrea Ladavac

Zagreb, 2016.

## **Zahvala**

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Ivanu Stojanoviću što mi je bio mentor i što mi je omogućio izradu završnog rada na području zaštite materijala, te na velikom strpljenju, uloženom trudu i pomoći pri izradi završnog rada.

Zahvaljujem se doc. dr. Sc. Vinku Šimunoviću na konstruktivnim kritikama i pomoći pri izradi završnog rada.

Zahvaljujem se svim djelatnicima u Laboratoriju za zaštitu materijala na pomoći prilikom izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem se roditeljima, obitelji i prijateljima na podršci tijekom studija .

Andrea Ladavac



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Datum 19-09-2018 Prilog
Klasa: 602-04/16-6/3
Ur.broj: 15-1703-16-324

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Andrea Ladavac**

Mat. br.: 0035191444

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**ZAŠTITNA SVOJSTVA PRAŠKASTE PREVLAKE NA ALUMINIJU**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**PROTECTION PROPERTIES OF POWDER COATING APPLIED  
ON ALUMINIUM STRUCTURES**

Opis zadatka:

Praškaste prevlake se nanose elektrostatskim postupkom, a koriste za zaštitu od korozije aluminijskih konstrukcija i u vrlo agresivnim okolišima kao što je to morska atmosfera.

U teorijskom dijelu rada izučiti literaturu i na prikladan način prikazati pojavne oblike korozije na aluminijskim konstrukcijama izloženih atmosferskim uvjetima. Opisati postupak zaštite od korozije praškastim prevlakama, obraditi njihova svojstva i područja primjene.

U eksperimentalnom dijelu rada, na pripremljenim uzorcima, potrebno je provesti fizikalno-kemijsko ispitivanje prevlaka te ispitivanje u slanoj komori sukladno normi HRN EN ISO 9227. Po završetku dati ocjenu svojstva zaštite.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Rok predaje rada:

1. rok: 25. veljače 2016.

2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.

3. rok: 17. rujna 2016.

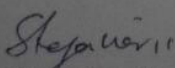
Predviđeni datumi obra

1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 20

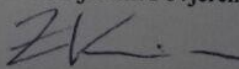
2. rok (izvanredni): 30. 06. 20

3. rok: 19., 20. i 21. 09. 20

Zadatak zadao:

  
Doc. dr. sc. Ivan Stojanović

Predsjednik Povjerenst

  
Prof. dr. sc. Zoran Kun

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA .....	IV
SAŽETAK .....	V
1. UVOD .....	1
1.1 Vrste korozije .....	1
1.1.1. Opća korozija .....	2
1.1.2. Lokalna korozija .....	2
1.1.3. Napetosna korozija .....	5
1.1.4. Filiformna korozija .....	6
1.1.5. Selektivna korozija .....	6
1.1.6. Interkristalna korozija .....	6
2. ALUMINIJ .....	7
2.1. Fizikalna svojstva aluminijske legure .....	7
2.2. Kemijska svojstva aluminijske legure .....	7
2.3. Afinitet aluminijske legure prema ostalim kemijskim elementima .....	8
2.4. Proizvodnja aluminijske legure .....	9
2.4. Primjena aluminijske legure .....	11
2.5. Korozijska postojanost aluminijske legure .....	14
2.6. Svojstva legure aluminijske legure .....	15
3. METODE ZAŠTITE ALUMINIJSKE LEGURE OD KOROZIJE .....	18
3.1. Toplinska obrada .....	18
3.2. Prevlačenje površine .....	19
3.3. Mehanička obrada .....	20
4. ZAŠTITA ORGANSKIM PREVLAKAMA .....	21
4.1. Premazivanje .....	21
4.2. Vrste premaza .....	22
4.2.1. Poliesterski premazi .....	22
4.2.2. Alkidni premazi .....	23
4.2.3. Epoksidni premazi .....	24
4.2.4. Poliuretanski premazi .....	24
4.2.5. Epoksi esterski premazi .....	25
4.2.6. Akrilatni premazi .....	25
5. PRAŠKASTE PREVLAKE .....	26

5.1. Svojstva praškastih prevlaka.....	27
5.2. Elektrostatsko nanošenje praškastih prevlaka.....	27
5.3. Oprema za nanošenje praškastih prevlaka .....	28
6. EKSPERIMENTALNI RAD .....	29
6.1. Plan pokusa .....	29
6.2 Mjerenje debljine prevlake .....	29
6.3. Mjerenje sjaja.....	31
6.3. Ispitivanje tvrdoće prevlake.....	32
6.4 Ispitivanje otpornosti na udar.....	33
6.5 Ispitivanje otpornosti prevlake na slanu atmosferu .....	34
6.7. Ispitivanje prionjivosti prevlake .....	36
6.7.1 Ispitivanje prionjivosti zarezivanjem mreže .....	36
6.8. Ispitivanje prionjivosti vlačnom metodom .....	39
7. ZAKLJUČAK .....	42
LITERATURA .....	44

## POPIS SLIKA

Slika 1. Korozija aluminijskih naplatka automobila [2] .....	1
Slika 2. Korozija aluminijske limenke [3] .....	2
Slika 3. Rupičasta korozija aluminijska [5] .....	3
Slika 4. Galvanska korozija aluminijska [5] .....	4
Slika 5. Napetosna korozija aluminijska [5] .....	5
Slika 6. Ruda boksita [9] .....	9
Slika 7. Ingoti aluminijska [9] .....	11
Slika 8. Aluminijska bejzbol palica [10] .....	12
Slika 9. Aluminijski krov [11] .....	12
Slika 10. Aluminijski naplatci [11] .....	13
Slika 11. SEM prikaz oksidnog filma aluminijska [12] .....	14
Slika 12. Razlika toplinski obrađenog i neobrađenog aluminijska [20] .....	19
Slika 13. Zaštita aluminijskih kipova anorganskom prevlakom [20] .....	19
Slika 14. Poliesterska prevlaka aluminijska [19] .....	23
Slika 15. Spremnici za vodu premazani izvana alkidnim premazima [19] .....	23
Slika 16. Epoksidne prevlake industrijskih podova [19] .....	24
Slika 17. Paluba zaštićena poliuretanom [19] .....	25
Slika 18. Akrilatni premaz automobila [19] .....	25
Slika 19. Praškasto prevlačenje bicikla [18] .....	26
Slika 20. Elektrostatsko naprašivanje [18] .....	27
Slika 21. Proizvodni postupak elektrostatskog naprašivanja [18] .....	28
Slika 22. Uzorci pripremljeni za ispitivanja .....	29
Slika 23. Postupak mjerenja debljine prevlake uređajem Elcometer 456 .....	30
Slika 24. Ispitivanje sjaja uređajem TQC [16] .....	31
Slika 25. Olovke koje se koriste pri ispitivanju .....	32
Slika 26. Ispitivanje tvrdoće prevlake .....	33
Slika 27. Uređaj za ispitivanje otpornosti na udar i ispitani uzorak .....	34
Slika 28. Slana komora .....	34
Slika 29. Uzorci ispitani u slanoj komori .....	35
Slika 30. Postupak ispitivanja prionjivosti premaza .....	37
Slika 31. Početna prionjivost praškaste prevlake .....	38
Slika 32. Ispitivanje Pull-off metodom .....	40
Slika 33. Početno ispitivanje uzorka .....	40

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Postupak mjerenja debljine prevlake .....	30
Tablica 2. Sjaj prevlake.....	31
Tablica 3. Rezultati ispitivanja u slanoj komori, tanja debljina prevlaka .....	35
Tablica 4. Rezultati ispitivanja u slanoj komori, veća debljina prevlake .....	36
Tablica 5. Ocjenjivanje prionjivosti premaza prema normi ISO 2409 .....	38
Tablica 6. Rezultati ispitivanja prionjivosti nakon ispitivanja u slanoj komori .....	39
Tablica 7. Ispitivanje prionjivosti vlačnom metodom .....	41



## SAŽETAK

Završni rad sastoji se od teorijskog djela i eksperimentalnog djela.

U uvodu teorijskog dijela rada je analizirana je korozija i vrste korozije. Opisan je aluminij, njegova kemijska i fizikalna svojstva, metoda dobivanja aluminija, primjena i korozijska postojanost. U posebnom poglavlju opisane su metode zaštite aluminija i prikazani su primjeri zaštite od korozije. Opisane su praškaste prevlake na aluminiju u svrhu zaštite od korozije te elektrostatsko naprašivanje.

Eksperimentalni dio sastoji se od mjerenja debljine prevlake, sjaja prevlake, otpornosti na udar i tvrdoće. Nakon mjerenja, ispitana je postojanost na koroziju uzoraka u slanoj atmosferi. Nakon ispitivanja u slanoj atmosferi provedeno je ispitivanje prionjivosti prevlake s dvije metode .

Ključne riječi : korozija, aluminij, korozijska postojanost, praškaste prevlake

## **SUMMARY**

This final work consist of two parts the theoretical part and the experimental part.

In the introduction to the theoretical part of the task, corrosion and corrosion types are discussed. In the next part of the task aluminium is described, as a metal with all of his chemical and physical properties. A description of a method of production of aluminium, the description of corrosion resistance and application in various types of industries is given in the text. In a separate chapter we describe the methods used to protect aluminium and gives examples of corrosion protection. Powdered coating on aluminium and the electrostatic application are described in the last chapter of the theoretical part.

The experimental part consists of measurements of coating thickness, gloss coating, impact resistance and hardness. The measured samples were tested in salt chamber. Following the tests in the salt chamberthere were made tests using two methods in order to determine the impact of salt atmosphere on corrosion resistance of powder coatings and adhesion of the coating on the aluminium samples.

Keywords: corrosion, aluminium, corrosion resistance, powder coatings

## 1. UVOD

Korozija je proces kemijskog trošenja materijala pri čemu na njega djeluje plinoviti ili kapljeviti medij te nastaju čvrsti, otopljeni ili plinoviti produkti korozije [1]. Posljedica korozije je smanjenje mase i dimenzija predmeta koji je korodirao, iako se nekad prividno može povećati masa i dimenzije zbog zadržavanja korozijskih produkata na površini materijala. Smanjenjem mase i dimenzija se smanjuje i nosivost predmeta. Korozija dovodi do [1]:

- povećanja hrapavosti površine
- pojave pukotina
- kvarenja izgleda
- povećanja površinskog električkog otpora
- onečišćenja tekućina.

Kako bi se smanjili troškovi i mogući kvarovi izazvani korozijom potrebno je dodatno zaštititi predmet. Dodatna zaštita predmeta moguća je odabirom korozijski postojanijeg materijala, nanošenjem zaštitnih prevlaka ili bojanjem i lakiranjem. Korozija ne izaziva samo ekonomsku štetu već može dovesti do kvarova ili lomova prilikom rada koji mogu biti pogubni za ljude. Na slici 1. je prikazana korozija aluminijskih naplatka automobila koja je mogla pruzročiti nesreću [1].



Slika 1. Korozija aluminijskih naplatka automobila [2]

### 1.1 Vrste korozije

Prema geometrijskom obliku korozijska oštećenja se mogu podijeliti na:

- opću koroziju

- lokalnu koroziju
- selektivnu koroziju
- interkristalnu koroziju.

### ***1.1.1. Opća korozija***

**Opća korozija** je najčešći i najrašireniji oblik korozije. Ovaj tip korozije je lako prepoznati jer zahvaća cijelu površinu koja je izložena agresivnom mediju. Iako je ovo najrašireniji oblik korozije, ujedno je i najbezopasniji, jer je vidljiv golim okom i može se na vrijeme spriječiti. Ovaj oblik korozije može se podijeliti na:

- ravnomjernu opću koroziju
- neravnomjernu opću koroziju.

Razlika između ova dva tipa opće korozije je u tome da ravnomjerna korozija napreduje jednakom brzinom po cijeloj korodiranoj površini, dok neravnomjerna korozija na nekim dijelovima površine napreduje brže, a na nekima sporije. Na slici 2. prikazan je slučaj opće korozije aluminijske limenke [1].



Slika 2. Korozija aluminijske limenke [3]

### ***1.1.2. Lokalna korozija***

**Lokalna korozija** je vrsta korozije koja zahvaća samo neke dijelove površine koji su izloženi agresivnom mediju. Kod ove vrste korozije gubitak materijala je znatno manji nego kod opće korozije, ali je daleko opasnija jer se teško zamjećuje, te može doći do iznenadnih havarija.

Ovaj oblik korozije može se podijeliti na [4]:

- pjegastu koroziju
- rupičastu koroziju

- podpovršinsku koroziju
- kontaktnu koroziju
- filiformnu koroziju.

**Pjegasta korozija** zahvaća anodna mjesta na površini izloženoj agresivnom mediju. Ova vrsta lokalne korozije je lako uočljiva i nije jako opasna.

**Rupičasta korozija** (pitting) je jedan od najopasnijih oblika korozije, jer prodire duboko u površinu materijala. Ovoj vrsti korozije su podložni željezo, cink, nikal, Cr-Ni čelici, aluminij, bakar te njihove legure i to najčešće prilikom izloženosti kloridnim elektrolitima. Rupičastoj koroziji pogoduju i lokalna onečišćenja površine (npr. kapljice metala ostale nakon zavarivanja), te je stoga potrebno redovito čistiti površinu metala kako bi se smanjili izgledi za nastanak ove opasne korozijske pojave. Na slici 3. je prikazana rupičasta korozija aluminija nastala krivom primjenom materijala [4].



Slika 3. Rupičasta korozija aluminija [5]

**Potpovršinska korozija** se javlja kod pojave rupičaste korozije kada se žarište korozije širi u dubinu materijala. Na površini materijala javljaju se mjehuri jer u unutrašnjosti materijala nastaju korozijski produkti čiji je volumen veći od volumena napadnutog metala. Ova vrsta korozije najviše se pojavljuje na valjanim metalima u dodiru s morskom vodom i kiselinama [1].

**Kontaktna korozija** nastaje prilikom dodira dva metalna dijela u elektrolitu. Kontaktna korozija se može podijeliti na:

- galvansku koroziju
- koroziju u procjepu.

Do galvanske korozije dolazi ukoliko su u dodiru dva metala različitih električnih potencijala uz prisutnost elektrolita, pri čemu korodira metal koji je manje plemenit. Do korozije u procjepu dolazi kada su u kontaktu dva metala istih električnih potencijala ili metal i nemetalni materijal, a čijim spajanjem nastaje procjep na konstrukciji. Kod ove vrste korozije metal unutar procjeka se ponaša kao anoda, te korodira, a metal izvan procjeka se ponaša kao katoda. Na slici 4. je prikazan slučaj galvanske korozije aluminijske cijevi po cijeloj površini predmeta nastale utjecajem agresivnog medija [4].



Slika 4. Galvanska korozija aluminijske cijevi [5]

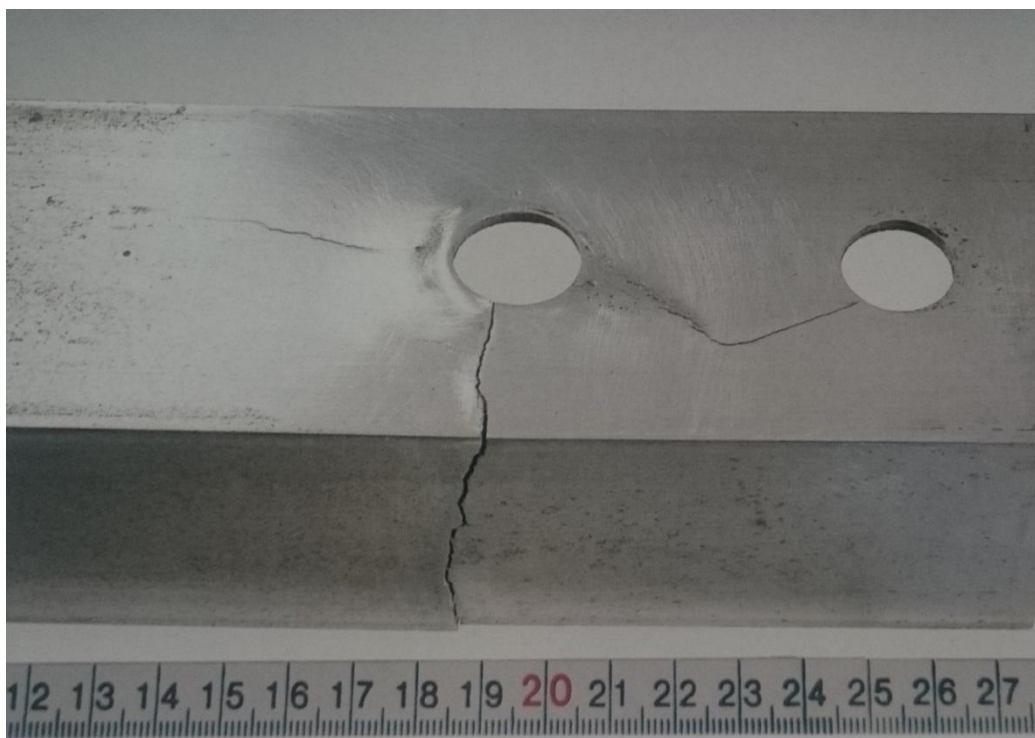


### 1.1.3. Napetosna korozija

Kako bi došlo do ove vrste korozije potrebno je ispuniti tri uvjeta:

- djelovanje vlačne sile koja djeluje na konstrukciju
- prisutnost agresivnog medija
- materijal koji pogoduje stvaranju napetosne korozije.

Ako jedan od ta tri faktora nije ispunjen, do napetosne korozije neće doći, te će brzina napredovanja korozije u tom materijalu biti znatno manja, nego što bi bila u slučaju pojave napetosne korozije. Također je važno napomenuti da se vlačna opterećenja mogu pojaviti i u obliku zaostalih naprezanja (primjerice nakon obrade zavarivanjem ili hladnog deformiranja). Na slici 5. je prikazana napetosna korozija aluminijskog krovnog elementa nastalog tijekom 2 godine [1].



Slika 5. Napetosna korozija aluminijskog krovnog elementa [5]

#### **1.1.4. Filiformna korozija**

Filiformna korozija nastaje na materijalima s prevlakom koja ne prijanja jako na površinu metala. Korodirano mjesto ima izgled crvotočine na površini metala. S obzirom da ova vrsta korozije ne napreduje u dubinu materijala, ona predstavlja većinom estetski problem. Može se spriječiti korištenjem plastificiranih prevlaka koje dobro prijanjaju na površinu metala [1].

#### **1.1.5. Selektivna korozija**

Selektivna korozija napada samo jednu od faza ili komponenti višefaznog ili višekomponentnog materijala.

Ova vrsta korozije može se podijeliti na [4]:

- faznu selektivnu koroziju,
- komponentnu selektivnu koroziju.

Primjer fazne korozije je grafitizacija sivog lijeva, a primjer komponentne korozije je decinkacija mjedi.

#### **1.1.6. Interkristalna korozija**

Interkristalna korozija je vrlo opasan oblik korozije, jer ju je teško zamijetiti dok se širi u dubinu materijala. Interkristalna korozija napreduje tako da razara materijal na granicama zrna, pri čemu dolazi do gubitka čvrstoće materijala te naposljetku do loma.



## 2. ALUMINIJ

Aluminij je meka i žilava kovina male gustoće i visoke rastezljivosti. Otporan je na djelovanje atmosferskih uvjeta, nekih kiselina i korozije. Dobar je vodič topline i elektriciteta što samim time povećava njegovu upotrebljivost u tehnici. Aluminij je treći najobilniji element u zemljinoj kori (8,1% težinski), odmah iza kisika i silicija. Usprkos tome, nije bio izoliran u elementarnom stanju sve do 1825. godine (H. C. Ørsted). Talište mu je pri 660 °C, a vrelište pri 2519 °C. Sam metal je jako reaktivan, ali je zaštićen tankim prozirnim slojem oksida, koji brzo nastaje na zraku. [6]

### 2.1. Fizikalna svojstva aluminija

Aluminiji ima kristalnu strukturu površinski centrirane kocke. Razmak mreže unutar kristala iznosi  $4,413 \cdot 10^{-8}$  cm, dok tvrdoća iznosi 2,9 po Mohsovoj skali. Tehnički aluminij dobiven elektrolitičkim postupkom Herault-hall sadrži 99,00-99,9% Al, iako je uobičajnije da sadrže oko 99,5% Al [7].

Glavne primjese tehničkog aluminija čine željezo i siliciji, koje dobivamo iz aluminijevog oksida, anode i elektrolita. Takve primjese nisu uvijek štetne za aluminij već mogu pridonjeti povećanju čvrstoće [7].

Najčišći mogući aluminij je dobiven elektrolitičkom rafinacijom iz kojega je moguće dobiti aluminij koji sadrži do 99.998% i naziva se *rafinal*. Što se tiče boje i odsjaja najčišći aluminij je svijetao kao srebro, dok tehnički zbog primjesa željeza i silicija ima modru refleksiju.

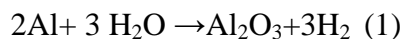
Fizičke karakteristike kao što su gustoća donekle ovise o stupnju čistoće metala i načinima obrade. Specifična gustoća najčišćeg aluminija je  $2,698 \text{ g/cm}^3$  pri sobnoj temperaturi. Gustoća prešanog ili valjanog tehničkog aluminija iznosi  $3,7 \dots 3,71 \text{ g/cm}^3$

### 2.2. Kemijska svojstva aluminija

Iako je aluminiji neplemeniti metal, vrlo je otporan na atmosferske uvjete. Uzrok postojanosti je film oksida koji nastaje odmah na svježoj površini čistog aluminija i zaštićuje ga od vanjskih utjecaja. Sami oksidni sloj štiti od daljnje oksidacije aluminija te možemo zaključiti da je aluminij ponekad sam sebi dovoljna zaštita. Važno je naglasiti da se zaštitni film stvara i na legurama aluminija te i na drugim legurama koje sadrže aluminij [4].

### 2.3. Afinitet aluminija prema ostalim kemijskim elementima

**Vodik** je dobro topljiv u tekućem aluminiju, a djelomično i u čvrstome obliku. Aluminij može primiti i vodik iz vlage u plinovima, takva vlaga se razgrađuje u tekućem aluminiju prema reakciji (1):



Iako je kompaktni aluminij na zraku postojan kada se govori o aluminijskoj prašini ona već na sobnoj temperaturi i pri vrlo niskoj vlazi oksidira, pri čemu se oslobađa velika količina toplina te dolazi do mogućnosti paljenja metalne površine.

**Klor** i ostali halogeni elementi mogu direktno reagirati s aluminijem, gdje dolazi do stvaranja klorida  $\text{AlCl}_3$  te dolazi do otpuštanja velike količine topline te uz prisutstvo vlage dolazi do ubrzavanja reakcija [7].

**Ugljični monoksid i ugljični dioksid** reagiraju s aluminijem tek pri visokim temperaturama gdje dolazi do stvaranja aluminijevog oksida i aluminijevog karbida  $\text{Al}_4\text{C}_3$ .

**Amonijak** ima svojstvo zadebljanja oksidnog filma i time povećava otpornosti koroziji.

**Sumpor** i njegovi spojevi ne doprinose nikakvim reakcijama do temperatura od približno 800 °C, ali je na višim temperaturama moguće je nastajanje  $\text{Al}_2\text{S}_3$ .

**Ugljik** je na nižim temperaturama slabo topljiv u tekućem aluminiju, dok je na višim temperaturama moguće postići spoj  $\text{Al}_4\text{C}_3$ .

Topljivost samog aluminija je vrlo dobra u natrijevim ili kalijevim lužinama kao i u solnoj i fluorovodičnoj kiselini. Samim time što aluminij i aluminijske legure posjeduju dobru postojanost na organske kiseline i ostale spojeve, dovelo je do komercijalnije uporabe aluminija u svakodnevnom životu, a pogotovo u prehrambenoj industriji u smislu ambalaža ili posuda [7].

## 2.4. Proizvodnja aluminija

Budući da su aluminijevi spojevi rasprostranjeni i čine značajan sastojak Zemljine kore, dostupni su, a aluminij se može izdvojiti iz bilo kojeg od njih. Međutim, komercijalno se koriste samo boksiti koji sadrže visok postotak (najmanje 50 %) aluminijevog-oksida uz istovremeno nizak sadržaj silicijevog-oksida.

Ime rude boksit potječe od Les Baux, mjesta u Francuskoj gdje je otkriven. Boksit je smjesa aluminijem bogatih primjesa, a od primjesa najviše ima silicijevog i željezovih oksida. Kako bi se ruda prevela u bezvodni  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (glinicu), potrebno ju je očistiti od primjesa. Primjenjuje se više postupaka, a daleko se najviše upotrebljava mokri postupak po Bayeru otkriven 1889. g. Na slici 6. je prikazana ruda boksita [8].



Slika 6. Ruda boksita [9]

U Bayerovom postupku fino samljevena ruda raščinjava se u autoklavu pri temperaturi od 160-170 °C i tlaku 5-7 bara kroz 6-8 sati pomoću 35-50 %-tne otopine natrijeve lužine. Neraščinjeni ostatak kojeg tvore uglavnom željezovi oksidi i nastali netopljivi spoj natrijev aluminijev silikat ( $\text{Na}_2[\text{Al}_2\text{SiO}_6] \times 2\text{H}_2\text{O}$ ) poznat kao "crveni mulj" koji se odlaže na posebna, samo za to izgrađena odlagališta (iz tog mulja mogu se izdvojiti drugi prateći elementi). Iz vrućeg filtrata iskristalizira se aluminijev hidroksid cijepljenjem otopine kristalima hidrargilita. Aluminijev hidroksid se žarenjem u rotacijskim pećima, na temperaturi iznad 1200 °C, prevodi u glinicu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) koja se podvrgava elektrolizi. Pri Bayerovom postupku javlja se značajan gubitak aluminijske i osobito natrijeve lužine zbog prisutnosti silicija pa je dobro da ga u rudi ima što manje. Elektroliza se provodi u elektrolitičkim kupkama s grafitnim elektrodama. Bayerovim postupkom dobivena glinica otapa se u kriolitu  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  radi sniženja tališta, tako da dobivena otopina ima talište oko 1000 °C, što je dvostruko manje od tališta same glinice (postupak Heroult i Halla) [8].

Aluminij se izlučuje na katodi i pada na dno kupke, a na anodi se oslobađa ugljični dioksid. Sam kriolit ne sudjeluje u elektrolitičkom procesu, a kako je njegova talina rijedja od aluminijske, pliva na površini i štiti aluminij od oksidacije.

Dobiveni aluminij ima primjese drugih metala (titanija, bakra i cinka), a najviše silicija. Daljnje pročišćavanje vrši se pretaljivanjem aluminijske u otpornim ili induktivnim električnim pećima tako da se talina aluminijske drži nekoliko sati na temperaturi od 700 °C kako bi primjese isparile ili isplivale na površinu, a pročišćeni aluminij ispušta se na dno. Za dobivanje aluminijske visoke čistoće provodi se naknadna elektrolitička rafinacija. Na slici 7. prikazani su ingoti aluminijske nakon proizvodnje [8].



Slika 7. Ingoti aluminija [9]

## 2.4. Primjena aluminija

Raznovrsna primjena aluminija omogućila je brzo širenje u industriji. Tako veliku rasprostranjenost primarno su omogućila odlična svojstva ovoga metala kao što su mala gustoća, korozijska postojanost, niska cijena i dobra čvrstoća.

Aluminiji je postao toliko široko rasprostranjen da ga pronalazimo u svakome kućanstvu, automobilu i ostalim predmetima koje svakodnevno koristimo, a da nismo toga ni svjesni. Primjerice u kućanstvima moguće je pronaći aluminij u predmetima kao što su ručke na vratima, prozorima, kućanskim aparatima, posuđu te raznovrsnoj sportskoj opremi kao što su palice za golf, bejzbol palice i teniski reketi. Na slici 8. se prikazuje aluminijska bejzbol palica [6].



Slika 8. Aluminijska bejzbol palica [10]

Niska cijena, jednostavno održavanje plasirali su aluminiji na sami vrh primjene metala u građevinarstvu. Aluminij je postao toliko neophodan materijal tako da bez njega neki elementi bi iziskivali puno veće troškove održavanja. Zbog toga se veliki asortiman predmeta izrađuje od aluminija kao što su npr. krovovi, rukohvati, stubišta pa sve do cijevi i žica. Slika 9. prikazuje uporabu aluminija u građevini gdje je korišten za izradu krova [8].



Slika 9. Aluminijski krov [11]

Jedna od najučestalijih primjena aluminija dolazi u obliku folija, čepova i limenki u prehrambenoj industriji. Aluminij zbog njegove velike otpornosti koroziji i pasivnosti

sprječava stvaranje toksina opasnih za ljude. Velika prednost aluminija u prehrambenoj industriji je da ne sadrži tvari koje bi mogle izmijeniti okus, boju i miris hrani i piću.

Aluminiji je pronašao široku primjenu i u automobilskoj, zrakoplovnoj i brodograđevnoj industriji. Zbog niže cijene mnogi proizvođači preferiraju aluminij od drugih metala. Velikoj razgranatosti aluminija u transportnoj industriji omogućili su svojstva kao što su povoljan omjer mase i čvrstoće, korozijska postojanost i dobra toplinska vodljivost. Boja i estetski izgled omogućili su aluminiju da postane jedan od vodećih materijala u izradi super automobila kao što su Ferrari, Lamborghini i Bugatti. Slika 10. prikazuje aluminijske naplatke super automobila marke Ferrari [8].



Slika 10. Aluminijski naplatci [11]

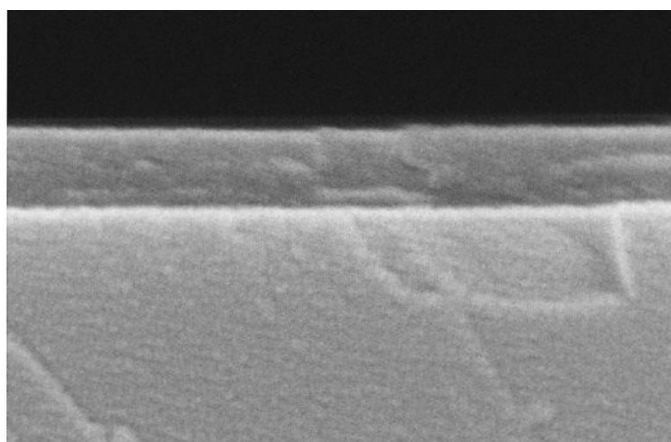
Aluminij se pokazao kao odlična zamjena za bakar pri izradi elektronskih komponenata i vodića. Preferira se zbog manje gustoće te mogućnosti prijenosa dvostruko većeg naboja od bakra iste mase. Danas se aluminij u elektronici primarno upotrebljava za izradu dalekovoda

zbog njegove lakoće obrade, smanjene mase, kemijske postojanosti u atmosferskim uvjetima te jednostavnosti održavanja [7].

## 2.5. Korozijska postojanost aluminija

Aluminij ima sve širu komercijalnu primjenu. Potrebno je poznavati korozivno ponašanje samoga aluminija da bi ga se mogla što bolje upotrijebiti u tehničkom i proizvodnom smislu.

Osnovne značajke korozijske postojanosti aluminija i njegovih legura prema velikome spektru vrsta korozija primarno pripada; nevidljivom, dobro prijanjajućem i zaštitnom filmu na površini metala prikazanog SEM snimkom na slici 11.



Slika 11. SEM prikaz oksidnog filma aluminija [12]

Aluminij je vrlo postojan na vrućim oksidativnim plinovima jer se prekriva zaštitnim filmom  $\text{Al}_2\text{O}_3$  izvrsnih zaštitnih svojstava. Ni prisutnost  $\text{SO}_2$  ili  $\text{H}_2\text{S}$  u takvim plinovima gotovo i ne smanjuje njegovu postojanost.

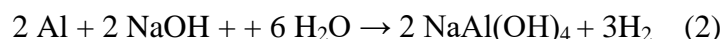
Aluminij pokazuje korozijsku postojanost i u mazivima i tekućim gorivima, te čak i u spojevima sumpora.

Osnovne značajke korozijskog ponašanja aluminija u elektrolitima sklonost pravom pasiviranju nastajanjem zaštitnog površinskog filma  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i nepostojanosti u lužnatim sredinama zbog amfoternog karaktera. Aluminij je redovno pasivan u vlažnim atmosferama, slatkoj vodi i mnogim aeriranim elektrolitima kojima je pH-vrijednost između 4 i 9. Jedino je moguće nastajanje pitinga u prisutnosti aniona, te mogućnost nastanka korozije i u neutralnim otopinama [1].



Postojanost aluminija na kiseline je vrlo dobra što ukazuje dobra postojanost na hladnu sulfatnu kiselinu, oksidativne kiseline, kakve su npr. nitratna i kromatna kiselina, kakve su primjerice octene kiseline i druge kiseline. Otpornost koroziji i neotrovnosti iona aluminija omogućilo je primjenu u prehrambenoj industriji. [4]

Lužnate otopine u kratkom vremenu otapaju aluminij uz prisutnost depolarizacije pri čemu dolazi do stvaranja kompleksnih aniona. Koroziju u lužnatoj otopini možemo prikazati jednadžbom (2) :



Slabe lužine kao što su npr. amoniji-hidroksid ne napadaju aluminiji, ali dok već jače lužine kao što su vapneno mlijeko (  $\text{Ca(OH)}_2$  ) negativno i razarajući djeluju na aluminiji.

Kod aluminija prilikom kontakta sa ostalim metalima u elektrolitu postoji mogućnost nastanka korozije. Od kojih najnepovoljnije djeluju bakar i njegove legure iako postoji mogućnost nastanka korozije i sa nelegiranim crnim metalima u otopinama velike provodnosti. Svi tehnički važniji metali, osim magnezija, cinka i kadmija, redovito su plemenitiji od aluminija. Međutim kontakt sa nekim nehrđajućim čelicima u određenim vrstama elektrolita može dovesti do pasivizacije i zaštite aluminija. Dok s druge strane cink može zaštititi aluminiji u kiselinama pa čak i u nekim slabijim lužinama tako da ga katodno zaštićuje. Slično djeluju magneziji i njegove legure, ali pritom može doći do nastajanja lužnatih otopina zbog velike gustoće struje depolarizacije. U elektrolitima je najbezopasniji kontakt s kadmijem jer oba metala obično imaju podjednake stacionarne potencijale [1].

## 2.6. Svojstva legura aluminija

Čisti aluminij bez ikakvih legiranih elemenata je mekan za bilo kakvu tehničku uporabu, zbog čega ga je potrebno legirati drugim elementima. Samim legiranjem poboljšavaju se mehanička svojstva, korozijska postojanost, tvrdoća, čvrstoća. Legure aluminija označavaju se brojkama, a prva brojka označava legirane elemente u leguri [7]:

- **1XXX** Aluminij s 99 % čistoćom sastava. 1xxx grupu aluminija ne smatra se legurama, već čisti aluminij sa određenim postotkom nečistoća od kojih su najčešće željezo i siliciji. Ove legure su relativno otporne na koroziju jedino ako u svome

sastavu imaju veći udio željeza postoji mogućnost nastanka rupičaste korozije, posebno u vodenim otopinama koje sadržavaju kloride.

- **2XXX** Legure aluminija koje sadrže primarno bakar, čiji postotak može dostići i do 7 %. Uz bakar česti legirani elementi su magneziji ili mangan, te u manjim postocima nalazimo legirane elemente kao što su litiji, srebro i nikal. Na legurama 2XXX provodi se toplinska obrada u svrhu ojačavanja. Uporaba ovih legura rasprostranjena je u zrakoplovnoj industriji zbog male mase. Prisutnost bakra smanjuje otpornost ove legure na opću koroziju i pitting.
- **3XXX** Legure aluminija koje sadrže do 1,5 % mangana i do 1,5 % magnezija. Koriste se primarno za očvršćivanje deformiranjem. Mangan ima minimalan utjecaj na smanjenje otpornosti prema koroziji, tako da ove legure imaju dobru otpornost na koroziju.
- **4XXX** Legure aluminija koje u sebi sadrže 14 % silicija. Te kako imaju nisko talište koriste se najčešće u zavarivanju. Silicij kao element ne povećava otpornost koroziji, ali postoji mogućnost da usred visoke temperature prilikom zavarivanja, silicij difundira u granice zrna te tako smanjuje otpornost legure na koroziju.
- **5XXX** Legure aluminija su one koje sadrže do 6 % magnezija te u nekima moguće je pronaći i mangana. Najčešća primjena je u izradi ploča i limova. 5XXX legure moguće je podijeliti na legure sa malim udjelom magnezija i legure s povećanim udjelom magnezija. Legure s manjim udjelom magnezija imaju prihvatljivu otpornost na koroziju, dok s druge strane legure većim udjelom imaju još veću otpornost na koroziju i veću čvrstoću, ali su osjetljive na interkristalnu koroziju, eksfolijaciju i napetosnu koroziju. Zbog toga se radna temperatura legura s visokim udjelom magnezija mora ograničiti na maksimalno 65 °C.
- **6XXX** Legure aluminije su one koje sadrže magneziji i siliciji te međusobno stvaraju magnezijev silicid koji im povećava čvrstoću. Imaju dobru korozijsku postojanost. Legiranjem bakrom smanjuje se korozijska postojanost za razliku od legura koje ga ne sadrže
- **7XXX** Legure aluminija su one koje sadrže 8 % cinka te ostale elemente u kao što su bakar i magneziji samo u manjim količinama. Korozijska postojanost 7XXX legura je smanjena zbog legiranja bakrom koji omogućava stvaranje pittinga i opće korozije.

- **8XXX** Legure aluminija koje sadrže željezo i to manje od 10 %. Većina tih legura se koristi u prehrambenoj industriji za pakiranje hrane. Kako je potrebno da ne dođe do kontaminacije hrane ove legure imaju jednu među najboljim korozivskim postojanostima među legura aluminija. Dodavanjem litija 8XXX legurama smanjuje se njihova gustoća što je dovelo do korištenja u svemirskoj industriji.

### 3. METODE ZAŠTITE ALUMINIJA OD KOROZIJE

Aluminij sam po sebi pokazuje odličnu korozijsku postojanost zbog zaštitnog filma oksida, no sami zaštitni film ponekad nije dovoljan da bi se spriječilo širenje korozije. Zato je potrebno koristiti dodatne mjere zaštite koje mogu smanjiti mogućnost nastanka korozije. Što se tiče aluminija se koriste 3 vrste zaštite [1]:

- toplinska obrada
- prevlačenje površine
- mehanička obrada.

#### 3.1. Toplinska obrada

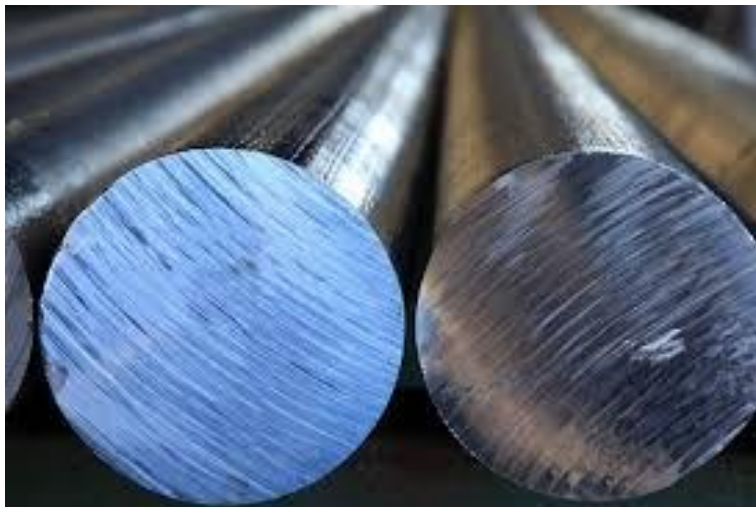
Aluminij možemo dodatno zaštititi od korozije koristeći metode toplinske obrade površine. Dvije različite skupine toplinske obrade omogućavaju veću zaštitu od korozije. Prvom skupinom toplinske obrade smanjuje zaostala naprezana dok drugom homogeniziramo površinu aluminija [4].

**Kaljenje** je postupak brzog hlađenja nakon bilo kakvog tretiranja metala povišenim temperaturama. Kaljenjem postizemo jednoliku mikrostrukturu predmeta što uvelike smanjuje opasnost nastanka korozije. Posebno je poželjno kaliti legure aluminija koje su sklonije interkristalnoj koroziji.

**Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja** je postupak toplinske obrade koji se provodi pri umjerenim temperaturama u cilju smanjenja zaostalih naprezanja. Ovaj postupak smanjuje čvrstoću legure, te povećava duktilnost i oblikovljivost te otpornost koroziji [6].

**Homogenizacija** je postupak dobivanja što jednoličnije mikrostrukture aluminija u svrhu smanjenja opasnosti od korozije, povećanja oblikovljivosti i obradljivosti. Smanjenjem kristalnih zrna povećava se ujedno i korozijska postojanost.

Slika 12. Prikazuje razliku između toplinski obrađenog aluminija i neobrađenog aluminija.



Slika 12. Razlika toplinski obrađenog i neobrađenog aluminija [20]

### 3.2. Prevlačenje površine

Aluminij je moguće dodatno zaštititi od korozije koristeći metode prevlačenja površina. Prevlačenje površine možemo kategorizirati po vrsti prevlaka koje mogu biti organske, anorganske i oksidne. Prevlake aluminija koriste se da bi se poboljšala otpornost na koroziju u nepovoljnim uvjetima korištenja kao što je prikazano na slici 13 [1].



Slika 13. Zaštita aluminijskih kipova anorganskom prevlakom [20]

**Organske prevlake** se primarno nanose na aluminij iz dekorativnih razloga, iako neke mogu povećati otpornost na koroziju. U odlomku 4 su opširnije opisane metode zaštite organskim prevlakama [4].

**Anorganske prevlake** se primarno sastoje od legura aluminija veće korozijske postojanosti koje su vezane za primarnu leguru koja ima manja korozijsku postojanost i samim time dodatno štiti.

Jedna od mogućih zaštita aluminija su anodne prevlake kojima se postiže zadebljanje sloja aluminijskog oksida. Zadebljanjem aluminijevog oksida dolazi do nastajanja prevlake kristalne mikrostrukture. Moguće je dodavanje pigmenata u svrhu dobivanja neke određene boje prevlake iz estetskih razloga. Kako je prevlaka iste strukture kao i sami aluminij ona povećava otpornost na većinu agresivnih medija, dok isto tako korodira u jakim lužinama i kiselinama [1].

### **3.3. Mehanička obrada**

Obradom aluminija mogući je nastanak zaostalih naprezanja koji uvelike mogu smanjiti otpornost na koroziju. Zato korištenjem mehaničkih obrada u svrhu smanjivanja zaostalih naprezanja, moguće je izbjeći nastanak napetosne korozije. Za smanjenje zaostalih naprezanja u aluminiju koristi se postupak sačmarenja [1].

## 4. ZAŠTITA ORGANSKIM PREVLAKAMA

Organskim se prevlakama smatraju sve one koje čini kompaktnima organska tvar stvaranjem opne. Takvi se slojevi dobiju nanošenjem organskih premaznih sredstava (bojanjem i lakiranjem), uobičajenim podmazivanjem, plastifikacijom, gumiranjem i bitumenacijom [1].

Sva premazna sredstva sadrže vezivo, koje čini opnu prevlake, i razrjeđivač, koji ima ulogu otapanja veziva te reguliranja viskoznosti. Osim toga, premazna sredstva mogu sadržavati pigmente i punila koja daju nijansu i čine premaze neprozirnim, kao i različite aditive. Prozirne ili bezbojne prevlake nazivamo lakovima, te ako su obojani mogu se razlikovati većom glatkoćom, sjajem i tvrdoćom prevlake. Boje i lakovi se najčešće nanose višeslojno u svrhu zaštitno-dekorativnog svojstva [4].

Organske premaze se razvrstava na nekoliko načina, od kojih ni jedan ne definira sredstvo u potpunosti. Glavni načini razvrstavanja premaznih sredstva su [1]:

- prema sastavu
- prema osnovnoj svrsi
- prema izgledu
- prema podlogama na koje se nanosi
- prema broju sastojaka koji se nanose prije miješanja
- prema ulozi u premaznom sredstvu
- prema načinu skrućivanja sloja.

### 4.1. Premazivanje

Premazivanje je postupak nanošenja premaznih sredstava (boja i lakova) na površinu materijala koji se želi zaštititi, ali osim zaštitne, oni pružaju i dekorativnu funkciju. Nanošenje boja i lakova na metalne i nemetalne podloge redovito se vrši višeslojno uz potpuno ili djelomično sušenje prethodno nanesenog sloja, a ponekad i uz njegovu mehaničku obradu [13].

Višeslojna veziva između slojeva u dodiru moraju biti kompatibilna kako bi zaštitni premaz dobro štitio predmet, što znači da na granici između dva premaza ne smije doći do procesa koji bi ugrozili kvalitetu premaza [13].

Jedno od temeljnih uvjeta za pravilno nanošenje premaza je da osnovni materijal i premaz budu kompatibilni, što ujedno vrijedi i za vezivo i otapalo, punilo i aditive. Ukoliko sve komponente premaza nisu kompatibilne jedne s drugima mogu loše djelovati na svojstva premaza. Kako bi se proizvelo kvalitetno premazno sredstvo potrebno je slijediti propise za miješanje veziva, pigmenata, punila, otapala i aditiva i to u različitim omjerima ovisno o primjeni tog premaza.

Tehnologije nanošenja premaza[13]:

- uranjanjem
- ličenjem
- nanošenje četkama
- prelijevanjem
- elektrostatskim prskanjem
- prskanje bez zraka
- prskanje u struji komprimiranog zraka.

## 4.2. Vrste premaza

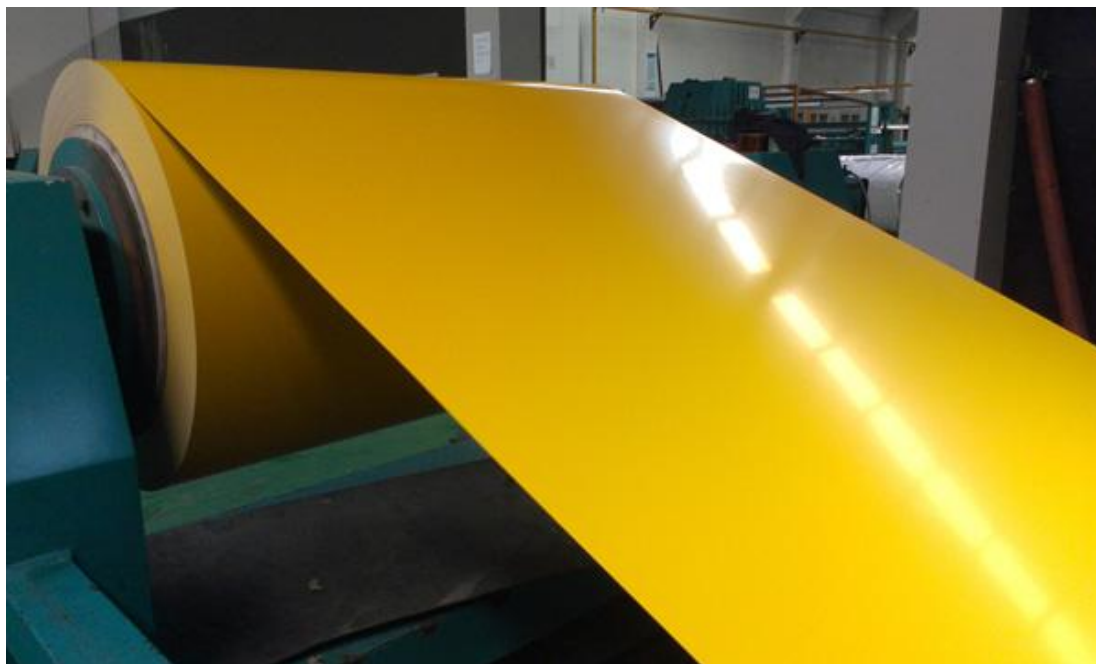
Premazi mogu biti [13]:

- poliesterski
- epoksidni
- epoksi esterski
- poliuretanski
- akrilatni
- alkidni

### 4.2.1. Poliesterski premazi

Umrežavanje poliesterskih premaza moguće je postići grijanjem ili katalitičkim postupcima. Dobro su postojani na povišenim temperaturama do 120 °C, uz dobru postojanost na atmosferi, slatkoj i slanoj vodi, slabim lužinama i kiselinama. Slika 14. prikazuje aluminij prevučen poliesterskom prevlakom.

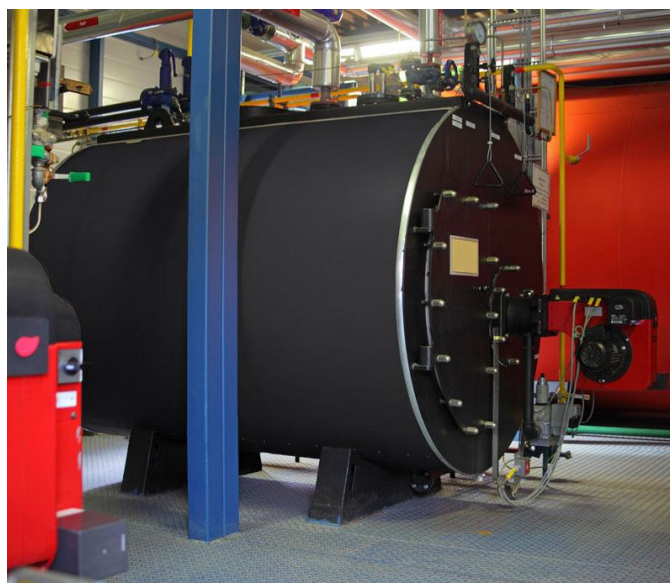




Slika 14. Poliesterska prevlaka aluminija [19]

#### ***4.2.2. Alkidni premazi***

Alkidni premazi nisu sušivi na zraku te ih je zato potrebno peći na temperaturama iznad 120 °C radi otvrdnjavanja. Alkidne prevlake su glatke i tvrde te postoje na temperaturama do 120 °C na atmosferi i slatkoj vodi. Alkidni premazi koriste se npr. za spremnike za vodu prikazane na slici 15.



Slika 15. Spremnici za vodu premazani izvana alkidnim premazima [19]

#### 4.2.3. Epoksidni premazi

Epoksidni premazi su uobičajeno dvokomponentni. Glavni sastojak prve komponente je epoksidna smola, a ovisno o formulaciji, ona može još sadržavati pigmente, punila, otapala i aditive raznih namjena. Druga komponenta su otvrdnjivači kao što su polifunkcionalni amini, kiseline i kiselinski anhidridi, fenol, alkohol i tioli. Epoksidi sušivi na zraku najčešće stvrdnjavaju preko epoksidnih skupina u reakciji s poliaminima. Na suncu i prilikom izloženosti UV zrakama skloni su kredanju jer se dolazi do raspadanja veziva, što je estetski problem, a smanjuje se i otpornost na trošenje trenjem. Podnose temperature do 120 °C. Postojani su u atmosferi i vodi, kiselim i lužnatim vodenim otopinama, u tlu i u organskim otapalima. Često su korišteni premazi za industrijske podove kao što je prikazano na slici 16.



Slika 16. Epoksidne prevlake industrijskih podova [19]

#### 4.2.4. Poliuretanski premazi

Poliuretanski premazi su smole s  $-NH$   $COO-$  skupinama u makromolekulama koji nastaju reakcijama između organskih spojeva. Premazna sredstva na bazi poliuretana mogu biti jednokomponentna ili dvokomponentna. Jednokomponentna sredstva otvrdnjavaju na djelovanjem vlage iz zraka, pečenjem na temperaturama višim od 85 °C ili su modificirana katranskom smolom. Dvokomponentni premazi koji su ujedno i najkvalitetnije jer su otporne na abraziju i temperature do 170 °C. Često korišteni za prevlačenje paluba teretnih brodova (slika 17.).



Slika 17. Paluba zaštićena poliuretanom [19]

#### ***4.2.5. Epoksi esterski premazi***

Epoksi esterski premazi nastaju reakcijom epoksidnih smola s masnim kiselinama iz sušivih ulja. Dodavanjem sikativa ubrzava se skrućivanje umrežavala. Postojanost epoksi esterskih premaza je vrlo dobra u vodi, kiselim i lužnatim vodenim otopinama te na temperaturama do 120 °C.

#### ***4.2.6. Akrilatni premazi***

Akrilatne premaze moguće je pronaći u termoplastičnom ili duromernom obliku. Svojstva ovih premaza je dobra postojanost na zraku, postojanost na UV zračenje i vodi. Koriste se kao zaštita boje na automobilima (slika 18.).



Slika 18. Akrilatni premaz automobila [19]

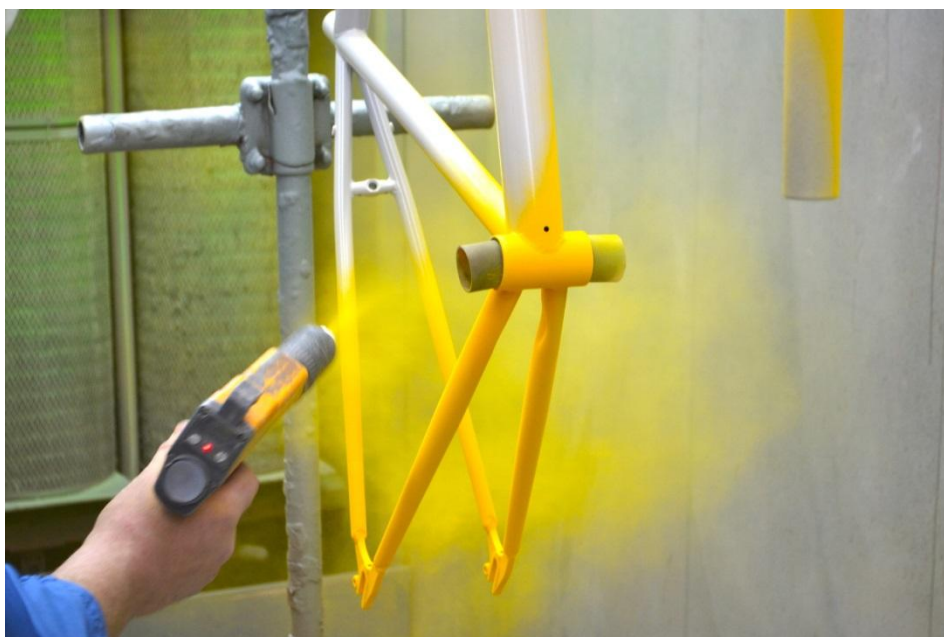
Trajnost zaštitnih premaza može varirati od 5 pa sve do 50 godina, ali je potrebno redovito održavanje nanošenjem novog sloja ukoliko dođe do oštećenja prevlake na zaštićenom materijalu.

## 5. PRAŠKASTE PREVLAKE

Praškaste prevlake su danas jedna od najbrže rastućih metoda zaštite materijala, te samim time mnoge industrije ulažu veliku količinu novca u njihova istraživanja i napredak.

Kako se danas nalazimo u vremenu sve veće zabrinutosti o okolišu, istraživanja novih tehnologija bez štetnih utjecaja postala su primarni cilj mnogim razvijenim zemljama. Postupak prevlačenja praškastim prevlakama pokazao se vrlo ekološki prihvatljiv za razliku od ostalih metoda prevlačenja površina. Kako su praškaste prevlake krute čestice, one nemaju štetnih organskih para, te su se pokazale kao odlična metoda smanjenja štetnih para kod boja i lakova. Recikliranje viška praška povećava iskoristivost i samim time smanjuje cijenu proizvodnje [13].

Praškaste prevlake pokazuju odlična svojstva zaštite od korozije, ogrebotina i udaraca. Bitni čimbenik praškastih prevlaka je smanjenje troškova prevlačenja predmeta. Sva navedena svojstva omogućila su sve veću primjenu praškastih prevlaka u različitim industrijama kao što su automobilska, zrakoplovna i prehrambena. Slika 19. prikazuje praškasto prevlačenje dijelova bicikla [17].



Slika 19. Praškasto prevlačenje bicikla [18]

## 5.1. Svojstva praškastih prevlaka

U usporedbi s metalnim i keramičkim prevlakama, praškaste prevlake prikazuju slabija svojstva, zbog toga veliki se broj istraživanja bavi povećanjem otpornosti trošenju i mehaničkih svojstava polimernih praškastih prevlaka.

Većina praškastih prevlaka sadrži čestice veličine od 50  $\mu\text{m}$ , temperature taljenja od oko 150 °C sa temperaturom polimerizacije od oko 200 °C u trajanju od 10 do 15 min.

Praškaste prevlake pokazuju odličnu korozijsku postojanost, otpornost na udarce i otpornost na trošenje [13].

## 5.2. Elektrostatsko nanošenje praškastih prevlaka

Praškaste prevlake se primarno nanose elektrostatskim naprašivanjem. Elektrostatsko naprašivanje je postupak nanošenja polimerne prevlake na metalne predmete ili druge električki vodljive predmete. Postupak se provodi nanošenjem električki nabijenog polimernog praha na željeni predmet, nakon čega slijedi postupak taljenja unutar peći te hlađenja nakon čega se stvara zaštitna prevlaka na površini predmeta. Na slici 20. prikazan je postupak elektrostatskog naprašivanja [13].



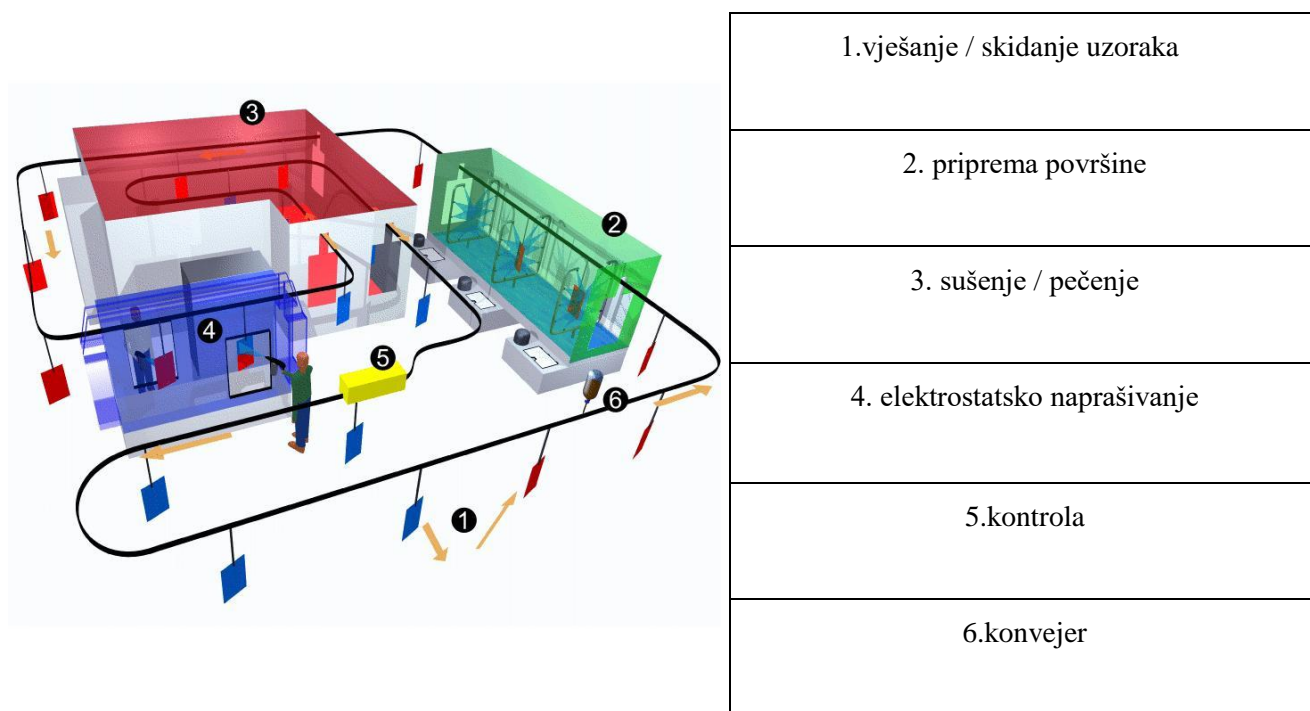
Slika 20. Elektrostatsko naprašivanje [18]

Kako se kod elektrostatskog naprašivanja praškastih prevlaka ne primjenjuje otapalo, postupak se još naziva i suho ličenje. Ekološki je elektrostatsko naprašivanje vrlo povoljno, osobito u usporedbi sa ostalim metodama nanošenja prevlaka s hlapljivim organskim tvarima. Iz nanesenog praha prevlaka se oblikuje taljenjem na temperaturu od 180 °C do 250 °C što omogućava bolju prionjivost zaštitnog filma [14].



Prah se u elektrostatičkom pištolju dovodi pneumatski, a dok se neiskorišteni dio praha sakuplja u pneumatskom separatoru. Neiskorištenog praha prilikom elektrostatskog naprašivanja iznosi približno 20 %. Stoga se postupak obavlja u zatvorenim prostorima koje su dodatno zaštićene zbog mogućnosti nastajanja eksplozivne smjese zraka i praha [15].

Elektrostatskim naprašivanjem moguće je postići glatke slojeve debljine od 0,05 do 1,5 mm. Što se tiče ekonomskog aspekta elektrostatskog naprašivanja, ono iziskuje veće investicije koje se mogu isplatiti za uređaje većih kapaciteta [1].



Slika 21. Proizvodni postupak elektrostatskog naprašivanja [18]

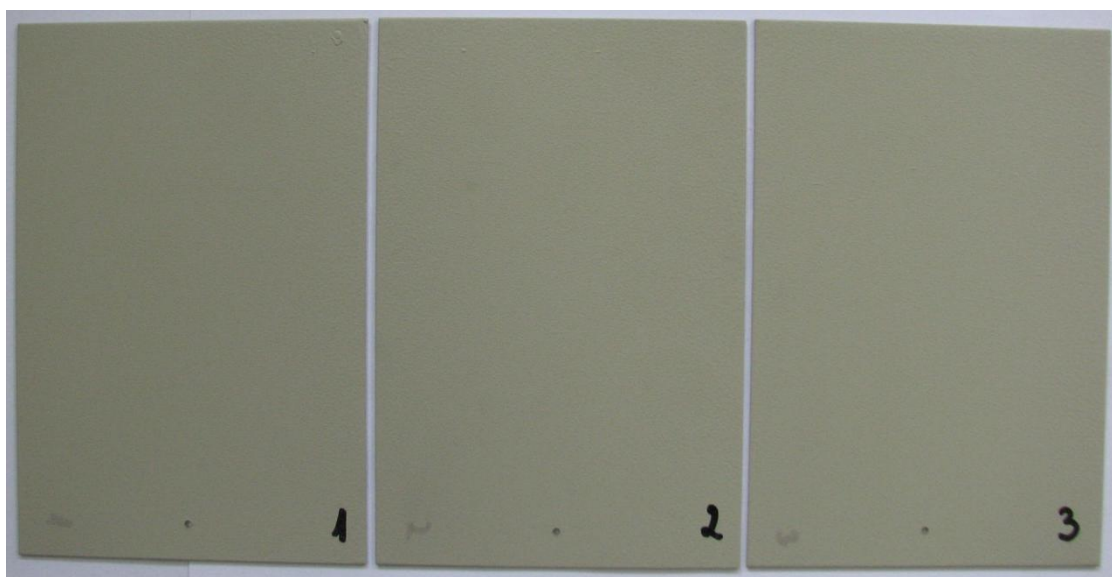
### 5.3. Oprema za nanošenje praškastih prevlaka

Oprema za nanošenje praškastih prevlaka metodom elektrostatskog naprašivanja se sastoji od pištolja za elektrostatsko naprašivanje, spremnika praška i izvora istosmjerne struje. Naponi kojima se električki nabija prašak su istosmjerni naponi do 100 kV, a jakost struje može varirati do 160  $\mu$ A. Pištolj je, osim na izvor struje, priključen i na izvor komprimiranog zraka. Tlak zraka u pištolju može varirati od 6 do 8 bara. Protok praška je obično od 2 do 6  $\text{m}^3/\text{h}$ , ali može biti i do 12  $\text{m}^3/\text{h}$  [13].

## 6. EKSPERIMENTALNI RAD

### 6.1. Plan pokusa

Svrha ovog eksperimenta je ispitati zaštitna svojstva praškaste prevlake na aluminiju. Eksperimentalni rad se sastojali od ispitivanja korozijske postojanosti i mehaničkih svojstava praškaste prevlake na aluminiju. Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za zaštitu materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitni uzorci pripremljeni su u tvrtci Končar sklopna postrojenja u Zagrebu (slika 22).



Slika 22. Uzorci pripremljeni za ispitivanja

Ispitivanjima korozijske postojanosti praškastih prevlaka na aluminiju utvrđeno je ponašanje prevlaka u slanoj atmosferi.

Prilikom ispitivanja mehaničkih svojstava ispitana su svojstva poput prionjivosti prevlake za podlogu te mehaničkih svojstava kao što su tvrdoća i otpornost na udar.

### 6.2 Mjerenje debljine prevlake

Mjerenje debljine praškaste prevlake provedeno je prema normi ISO 2808 u Laboratoriju za zaštitu materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Pri mjerenju korišten je uređaj Elcometer 456 koji mjeri debljinu prevlake na aluminiju pomoću vrtložnih struja. U tablici broj 1. prikazan je postupak mjerenja debljine prevlake. Prilikom mjerenja debljine prevlake izvršena su 10 mjerenja po uzorku. Nakon čega je računalnim programom uređaja

izračunata maksimalna, minimalna i aritmetička sredina debljine prevlake za uzorke broj 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9 i 10.

Tablica 1. Postupak mjerenja debljine prevlake

Uzorak br.	Maksimalna debljina [ $\mu\text{m}$ ]	Minimalna debljina [ $\mu\text{m}$ ]	Aritmetička sredina [ $\mu\text{m}$ ]
1	90,2	60,5	80,56
2	118	91	100,9
3	120	97	108
4	123	92,6	104
5	132	84	114
6	124	96,7	116,16
7	114	76	94,31
8	136	114	124
9	120	86	105
10	134	113	120,8

Nakon mjerenja debljina prevlaka izdvojeni su uzorci većih i manjih debljina u svrhu ispitivanja utjecaja debljine uzorka na mehanička i korozijska svojstva.



Slika 23. Postupak mjerenja debljine prevlake uređajem Elcometer 456



### 6.3. Mjerenje sjaja

Ispitivanje sjaja praškastih prevlaka aluminija provedeno je u Laboratoriju za zaštitu materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu prema normi ISO 2813. Ispitivanje sjaja provedeno je na uzorku broj 3. pomoću uređaja PolyGloss koji upad svjetlosti na površinu prevlake mjeri pri kutovima od 85°, 60° i 20° prikazanim na slici 24. Mjerni uređaj prikazuje sjaj u jedinici sjaja GU.



Slika 24. Ispitivanje sjaja uređajem TQC [16]

Ispitivanjem sjaja prevlake dobiveni su rezultati prikazani u tablici 2.

Tablica 2. Sjaj prevlake

20°	60°	85°
0,9 GU	4,6 GU	6,5 GU

Izmjereni sjaj praškaste prevlake aluminija nalazi se između 1 i 10 GU što označava da se radi o mat premazu.

### 6.3. Ispitivanje tvrdoće prevlake

Ispitivanje tvrdoće praškaste prevlake na aluminijskoj površini provedeno je u Laboratoriju za zaštitu materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu prema normi ISO 15184. Pri ispitivanju tvrdoće prevlake korišteni su test olovke različitih tvrdoća. Oznake tvrdoće olovaka koje se koriste u ovom ispitivanju od najtvrdje do najmekše su: 6H, 5H, 4H, 3H, 2H, H, F, HB, B, 2B, 3B, 4B, 5B, 6B su prikazane na slici 25.



Slika 25. Olovke koje se koriste pri ispitivanju

Ispitivanje tvrdoće prevlake provodi se pričvršćivanjem olovke najveće tvrdoće na pokretni uteg koji pritišće olovku konstantnom silom o ispitnu površinu. Nakon čega se uteg pokreće rukom po ispitnom uzorku. Ukoliko olovka ostavi ogrebotinu na površini uzorka stavlja se olovka manje tvrdoće. Ispitivanje završava kada prva olovka ne ostavlja ogrebotinu na uzorku. Tvrdoća posljednje olovke označava tvrdoću prevlake.

Prevlake kod kojih olovke u intervalu 6H-3H ne ostavljaju trag su tvrde prevlake, 2H-2B su srednje tvrde prevlake, a 3B-6B su meke prevlake. Ispitivanje je provedeno na uzorku 6 i 11.

Nakon ispitivanja utvrđeno je da olovka HB nije ostavila ogrebotinu na površini prevlake, što ukazuje da su praškaste prevlake srednje tvrde prevlake. Na slici broj 26 prikazano je ispitivanje tvrdoće prevlake.



Slika 26. Ispitivanje tvrdoće prevlake

#### 6.4 Ispitivanje otpornosti na udar

Ispitivanje otpornosti na udar praškaste prevlake na aluminiju provedeno je u Laboratoriju za zaštitu materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitivanjem je utvrđena otpornost prevlake na udarno opterećenje. Promatrane su veličine opterećenja pri kojima je došlo do pucanja ili odvajanja prevlake od aluminija. Ispitivanje je provedeno sukladno normi ISO 6272 na uzorku broj 4.

Ispitivanje se provodi pomoću utega koji vođen u vertikalnoj cijevi, slobodnim padom okomito pada na površinu uzorka s određene visine. Uteg za ispitivanje otpornosti na udarno opterećenje izrađen je tako da glava utega koja udara u površinu uzorka ima sferni oblik promjera 20 mm. Težina utega je 1000 g.

Ispitivanje je provedeno na principu podizanja utega na visinu pri kojoj se ne očekuje oštećenje prevlake, nakon čega se uteg ispušta na uzorak. Ukoliko prilikom udarca nije došlo do vidljivih oštećenja visina utega se podiže za dodatnih 5 cm. Ponavljanje postupka je sve do pojave oštećenja na prevlakama. Na slici 27. je prikazan uređaj za ispitivanje otpornosti na udar.



Slika 27. Uređaj za ispitivanje otpornosti na udar i ispitani uzorak

Visina pri kojoj nije došlo do vidljivih oštećenja na praškastoj prevlaci na aluminiju iznosi 13 cm. Ispitivanjem otpornosti na udar uočljivo je da praškaste prevlake aluminija imaju smanjenu otpornost na udar te same prevlake nisu pogodne za zaštitu od udaraca.

### 6.5 Ispitivanje otpornosti prevlake na slanu atmosferu

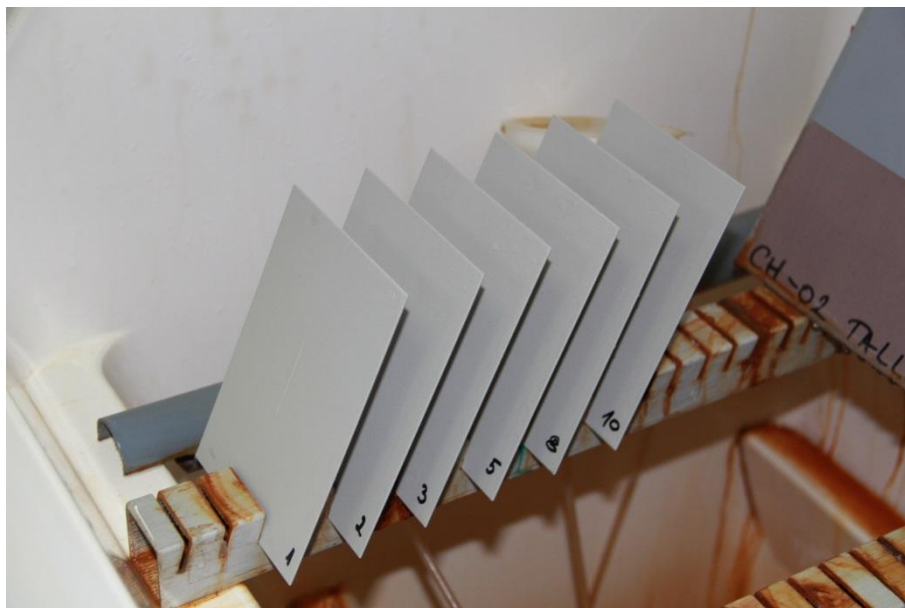
Otpornost praškastih prevlaka na slanu atmosferu provedeno je u Laboratoriju za zaštitu materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Kako bi se ispitala svojstva praškastih prevlaka potrebno je bilo provesti ispitivanja u slanoj komori. Provedena ispitivanja su sukladno normi ISO 9227.

Ispitivanje uzoraka br. 1, 2, 3, 5, 8, i 10 provedeno je u slanoj komori marke Ascott, model S450, prikazanog na slici 28. Ispitivanje je provedeno u trajanju od 720 sati.



Slika 28. Slana komora

Prilikom ispitivanja uzoraka u slanoj komori nije došlo do oštećenja prevlaka. Slika 29. prikazuje uzorke ispitane u slanoj komori. Rezultati ISO 9227 prikazani su u tablicama 3 i 4.



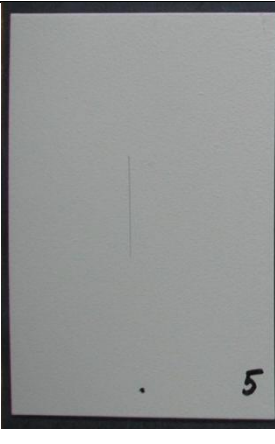
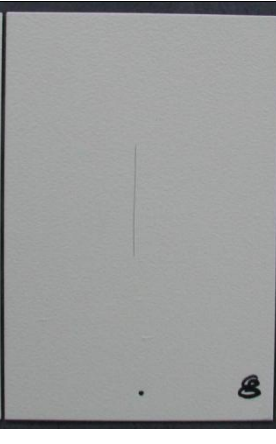
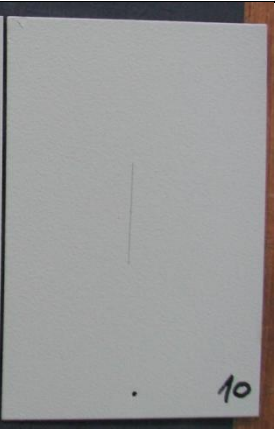



Slika 29. Uzorci ispitani u slanoj komori

Tablica 3. Rezultati ispitivanja u slanoj komori, tanja debljina prevlaka

Prije ispitivanja. Debljina premaza je od 80 do 100 $\mu\text{m}$ .				
Nakon ispitivanja. Nisu vidljivi korozijski produkti podloge aluminijske. Nije došlo do propadanja premaza u obliku mjehuranja ili ljuštenja.				



Tablica 4. Rezultati ispitivanja u slanoj komori, veća debljina prevlake

			
Prije ispitivanja. Debljina premaza je od 100 do 120 $\mu\text{m}$ .			
			
Nakon ispitivanja. Nisu vidljivi korozijski produkti podloge aluminijske. Nije došlo do propadanja premaza u obliku mjehuranja ili ljuštenja.			

## 6.7. Ispitivanje prionjivosti prevlake

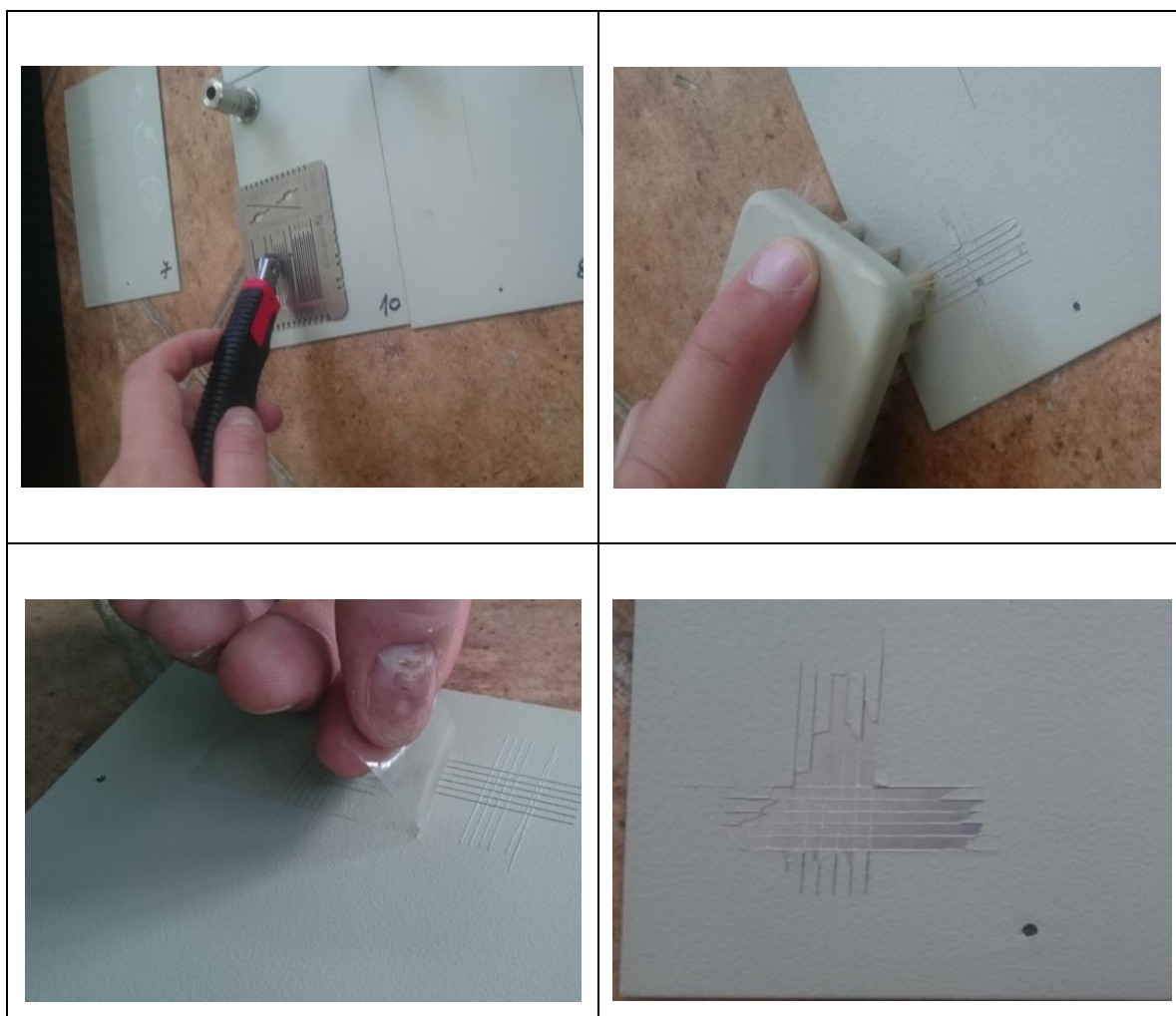
Ispitivanje prionjivosti praškaste prevlake na aluminiju provedeno je u Laboratoriju za zaštitu materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Svojstvo prionjivosti prevlake bitno utječe na kvalitetu same prevlake i mogućnost zaštite prevučenog materijala od udaraca, ogrebotina i nepovoljnih uvjeta. Ispitivanje je provedeno na uzorcima broj 1, 2, 3, 5, 6, 8, i 10 prema normama ISO 4624 ( Pull-off ) i ISO 2409 ( Cross-cut ).

### 6.7.1 Ispitivanje prionjivosti zarezivanjem mreže

Ispitivanje Cross-cut metodom provedeno je na način da se na uzorke uz pomoć oštice ureže mreža sa šest horizontalnih i šest vertikalnih ureza. Ovisno o debljini prevlake koriste se različite udaljenosti između ureza mreže. Kako su debljine prevlaka na ispitanim uzorcima između 80 i 120 mikrometara korištena je udaljenost od 2 mm prema normi ISO 2409.

Nakon urezivanja potrebno je temeljno očistiti mrežu kako bi se uklonile čestice nastale urezivanjem i dijelovi prevlake koji su se odvojili.



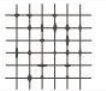

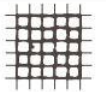

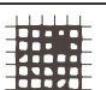


Nakon čišćenja potrebno je nanijeti ljepljivu traku na mjesto urezivanja. Ljepljiva traka mora biti dobro pričvršćena na površini uzorka zbog bolje adhezije. Nakon povlačenja ljepljive trake konstantnom silom, promatra postotka odvojene prevlake. Na slici 26 prikazano je ispitivanje prionjivosti Cross-cut metodom.



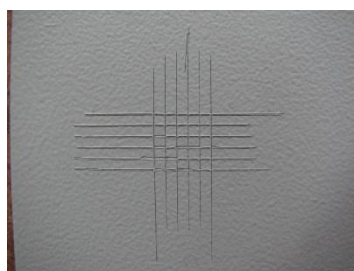
Slika 30. Postupak ispitivanja prionjivosti premaza

Ispitani uzorak se uspoređuje sa tablicom za ocjenjivanje prionjivosti prevlake. Tablica ocjenjivanja prionjivosti prevlake prikazana je na slici 30.

Tablica 5. Ocjenjivanje prionjivosti premaza prema normi ISO 2409

		0
		1
		2
		3
		4
		5

Početna prionjivost praškaste prevlake ocijenjena je ocjenom 0, slika 31.




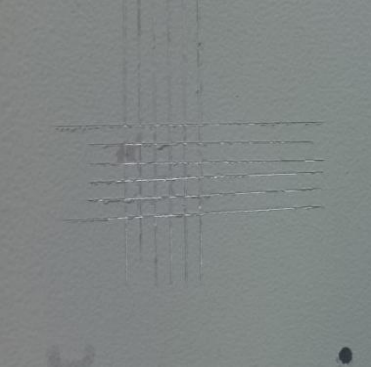
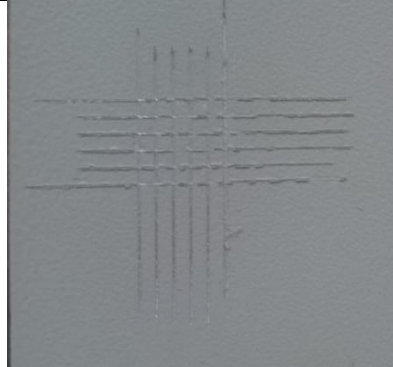

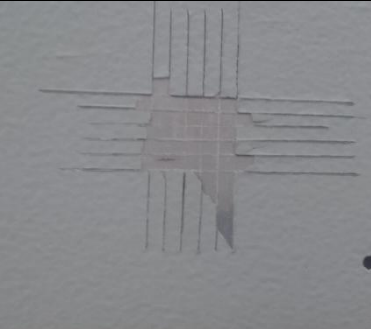
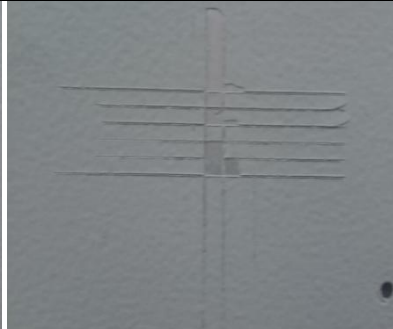
Slika 31. Početna prionjivost praškaste prevlake

Cross-cut ispitivanje provedeno je na uzorcima broj 1, 2, 3, 5, 7, 8, 9, 10. Na uzorku br 7. provedeno je početno ispitivanje prionjivosti Cross-cut metodom. Nakon ispitivanja Cross-cut metodom utvrđeno je da uzorci ispitani u slanoj komori nisu zadovoljili kriterije prionjivosti prevlake te su ocijenjeni ocjenom 3 za uzorke manjih debljina prevlake i ocjenom 5 za uzorke većih debljina prevlake. Ispitivanjem je utvrđeno da veća debljina prevlake slabije utječe na prionjivost ispitanih uzoraka praškaste prevlake u slanoj atmosferi.

Tablica 6 prikazuje rezultate ispitivanja prionjivosti prevlaka nakon 720 sati ispitivanja u slanoj komori.



Tablica 6. Rezultati ispitivanja prionjivosti nakon ispitivanja u slanoj komori

		
Uzorak 1. Ocjena 5	Uzorak 2. Ocjena 3	Uzorak 3. Ocjena 2
		
Uzorak 5. Ocjena 5	Uzorak 8. Ocjena 5	Uzorak 10. Ocjena 4

Praškaste prevlake pokazuju lošija svojstva prionjivosti nakon ispitivanja u slanoj komori. Uzorci bi vjerovatno pokazali puno bolja svojstva prionjivosti da su bili ispitani na kraće vrijeme.

### 6.8. Ispitivanje prionjivosti vlačnom metodom

Drugo ispitivanje prionjivosti praškaste prevlake na aluminjia provedeno je Pull-off metodom u Laboratoriju za zaštitu materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitivanje na uzorcima br 1, 2, 3, 5, 7, 8 i 10 provedeno je ljepljnjem ispitnih čunjića pomoću adhezivnog polimernog materijala na lagano prebrušenoj praškastoj prevlaci. Nakon toga je potrebno ostaviti ljepilo da se sasušu da bi se moglo nastaviti ispitivanjem. Nakon što se je ljepilo osušilo, mjerni uređaj se pričvrćuje na uzorke. Postupnim povećanjem pritiska dolazi do odvajanja čunjića sa površine uzorka. Ispitivanje je provedeno mjernim uređajem prikazanim na slici 32. prema normi ISO 4624.



Slika 32. Ispitivanje Pull-off metodom

Promatranjem dobivenih sila utvrđujemo sposobnost prionjivosti prevlaka na ispitanim uzorcima.

Pull-off ispitivanje provedeno je na uzorcima br 1 2 3 5 7 8 i 10.



Na uzorku broji 7 provedeno je ispitivanje Pull-off metodom bez prethodno provedenih korozivskih ispitivanja u svrhu prikazivanja svojstava prionjivosti prevlaka prije izlaganja korozivnoj okolini, prikazane na slici 33.



Slika 33. Početno ispitivanje uzorka

Na uzorcima br. 1, 2, 3, 5, 8 i 10 provedeno je ispitivanje prionjivosti prevlake Pull-off metodom nakon ispitivanja u slanoj komori u trajanju od 720 sati. Rezultati su prikazani u tablici 7.

Tablica 7. Ispitivanje prionjivosti vlačnom metodom

		
Ispitivanje uzoraka veće debljine		
		
Ispitivanje uzoraka manje debljine		

Nakon ispitivanja pull-off metodom pokazalo se da praškaste prevlake nemaju dovoljnu prionjivost za osnovni materijal jer su rezultati manji od 5 MPa. Veliki utjecaj trajanja ispitivanja u slanoj komori vidljivo je na prevlakama, koje bi pokazale bolja svojstva da su bile kraće u slanoj atmosferi.

## 7. ZAKLJUČAK

Svake godine štete nastale zbog korozije prelaze milijarde dolara. Kako bi se smanjio utjecaj korozije potrebno je dodatno zaštititi predmete izborom korozijski postojanog materijala ili dodatnim metodama zaštite kao što su prevlačenje materijala, toplinska obrada ili mehanička obrada. Aluminijski kao metal posjeduje izvrsnu otpornost koroziji, koja se pridodaje zaštitnom oksidnom filmu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  na površini aluminijski koji nastaje pri dodiru s kisikom iz zraka. Zaštitna svojstva samoga aluminijski ponekad nisu dovoljna da bi se zaustavilo širenje korozije, tada je potrebno dodatno zaštititi ostalim metodama zaštite kao što su prevlačenje prevlakama.

Prevlačenjem aluminijski organskim praškastim prevlakama moguće je zaštititi predmet od djelovanja agresivnih medija poput kiselina, lužina ili slane atmosfere. Praškaste prevlake pokazale su odlična svojstva zaštite uz moguće recikliranje i minimalno onečišćenje okoliša.

U eksperimentalnom dijelu rada ispitani su uzorci aluminijski prevučeni praškastim prevlakama. Prije samih ispitivanja bilo je potrebno izmjeriti debljinu, sjaj i tvrdoću prevlaka. Nakon mjerenja debljine prevlake, uzorci su razvrstani u dvije skupine od kojih jedna ima manju debljinu prevlake koja iznosi od 80 do 100  $\mu\text{m}$  i drugu skupinu čija debljina prevlake iznosi od 100 do 120  $\mu\text{m}$ . Uzorci su razvrstani kako bi se ispitao utjecaj debljine prevlake na korozijsku postojanost i prionjivost praškaste prevlake aluminijski.

Mjerenjem sjaja prevlaka dobiveni su rezultati koji ukazuju da ispitane praškaste prevlake pripadaju mat premazima, dok je mjerenjem tvrdoće olovkama utvrđeno da se radi o srednje mekanim prevlakama.

Mehaničkim ispitivanjima otpornosti na udar i prionjivosti prevlake ispitana su svojstva prevlaka na uzorcima. Ispitivanjem otpornosti na udar vidljivo je da praškaste prevlake nisu pogodne za zaštitu od udarca, jer već pri malim silama dolazi do ljuštenja i otpadanja prevlaka.

Kako bi se ispitala korozijska postojanost praškaste prevlake aluminijski na slanu atmosferu, uzorci su ispitani u slanoj komori u trajanju od 720 sati. Nakon ispitivanja u slanoj komori uzorci nisu pokazivali znakove korozije ili nastajanje korozijskih produkata.

Ispitivanja prionjivosti praškastih prevlaka aluminijski provedena su dvijema metodama: ispitivanje prionjivosti prevlake zarezivanjem mreže (Cross-cut) i ispitivanja prionjivosti prevlaka vlačnom silom (Pull-off). Ispitivanjem prionjivosti dviju metodama ukazuju na

deterioraciju svojstava i nezadovoljavajućih rezultata prionjivosti prevlaka nakon dugotrajnog ispitivanja u slanoj komori.

Nakon provedenih ispitivanja moguće je zaključiti da praškaste prevlake povećavaju postojanost aluminija na slanu atmosferu, dok debljina same prevlake nema velikog utjecaja na prionjivost prevlake. Vidljivo je da je dugotrajnim izlaganjem slanoj atmosferi došlo do drastičnog smanjenja prionjivosti prevlaka i njezinih adhezijskih svojstava. Da bi se dobili bolji rezultati dugotrajne zaštite aluminija bilo bi potrebno koristiti otpornije praškaste prevlake.

## LITERATURA

- [1] I. Esih: „Osnove površinske zaštite“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2003
- [2] [http://www.refinishingequipment.com/wheelcrafters1\\_003.htm](http://www.refinishingequipment.com/wheelcrafters1_003.htm) pristupio 25.8.2016
- [3] [http://www.all-science-fair-projects.com/print\\_project\\_1145\\_147](http://www.all-science-fair-projects.com/print_project_1145_147) pristupio 25.8.2016
- [4] I. Esih, Z. Dugi: „TEHNOLOGIJA ZAŠTITE OD KOROZIJE“, Školska knjiga, Zagreb, 1990
- [5] E.D.D „During Corrosion Atlas,  
Third Edition: A Collection of Illustrated Case Histories“, Elsevier Science , 1997
- [6] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: „Svojstva i primjena materijala“,  
Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006.
- [7] „Tehnička enciklopedija“, Leksikografski zavoda Miroslav Krleža , Zagreb, 1963
- [8] <https://www.britannica.com/science/aluminum> pristupio 28.8.2016
- [9] <http://www.daviddarling.info/encyclopedia/B/bauxite.html> pristupio 28.8.2016
- [10] <https://www.amazon.com/aluminiumbat> pristupio 28.8.2016
- [11] <http://www.usesof.net/uses-of-aluminum.html> pristupio 28.8.2016
- [12] <http://www.mdpi.com/1996-1944/8/2/600/html> pristupio 28.8.2016
- [13] I. Juraga, V. Alar, I. Stojanović „Korozija i zaštita premazima“,  
Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2014.
- [14] R. Mafi, S.M. Mirabedini, R. Naderi, M.M. Attar „Effect of curing characterization on  
the corrosion performance of polyester and polyester/epoxy powder coating“ Polymer  
Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Theran, Iran, 2008
- [15] U.Shah , J. Zhu „ Numerical investigation of corase powder and air flow  
in an electrostatic powder coating process“ J. H. Norther Senior, 2006
- [16] M. Zaouri, M. Kharrat, M. Dammak, M. Barletta „ Scratch resistance and tribological  
performanceof thermosetting composite powder coatings system: A comparative  
evaluation “ Department of Mechanical Engineering, University of Rome, Italy, 2015
- [17] I. Krylova „ Painting by electrodeposition on the eve of the 21st century“, Research  
Institute of Paint Coating, Moscow, Russia, 2001
- [18] <http://www.ameetuff.in/> pristupio 29.8.2016
- [19] [http://www.rdmengineering.co.uk/powder\\_coating.htm](http://www.rdmengineering.co.uk/powder_coating.htm) pristupio 29.8.2016
- [20] <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2540> prisutpio 30.8.2016